DOI: 10.22067/jmme.2022.73743.1033
https://jmme.um.ac.ir/

تاثیر ترکیبات کربناتی و کربن اکسید کروم و SiC درپخت سرباره فولاد*

مقاله پژوهشی

آیدا فایقی نیا[۱]   حسین مردی[۲]

چکیده *در کار حاضر، سرباره شیشه ای کوره قوس الکتریک شرکت فولاد مبارکه، و ضایعات شیشه سودالایم فلوت شیشه پنجره ، با نسبت وزنی مساوی مخلوط شد و این ترکیب پایه به همراه عوامل فوم زای متعدد پخت شد. پنج نوع عامل فوم زا، شامل کاربید سیلیسیوم ، کربنات کلسیم ، اکسید کروم، گرافیت و کربنات باریم در پنج قسمت وزنی به ترکیب پایه اضافه گردید، کل مخلوط های کامپوزیتی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد با سرعت ۱۰ درجه بر دقیقه و زمان ماندگاری سه دقیقه پخت شد. فاز کریستالی متبلور شده در کامپوزیت ها با درصد وزنی کم عامل فوم زا، فاز وولاستونیت و با افزایش درصد وزنی عامل فوم زا تا ۵٪ وزنی فاز شبه ولاستونیت بود. بیشترین افزایش حجم در کامپوزیت(۲/۵ برابر) مربوط به نمونه با ۵ درصد وزنی کربنات باریم و بیشترین تخلخل (۸۴درصد) مربوط به کاربید سیلیسیوم با ۱ درصد وزنی می باشد . بالاترین استحکام فشاری در بین سه ترکیب تایید شده از لحاظ ریز ساختاری، مربوط به نمونه با یک درصد وزنی کربنات کلسیم بود که ۴/۸ مگا پاسکال به دست آمد . همچنین توزیع تخلخل ها در تمامی کامپوزیت های فوم دار غیر یکنواخت بوده و تنها نمونه اکسید کروم دار توزیع تخلخل بهتری نسبت به سایرین دارد*

.واژه های کلیدی کربنات، شیشه-سرامیک، تخلخل،پخت.

مقدمه

فوم، به معنی جرم کفی است، که این کف سبک، متشکل از حباب¬های ریزی در درون یا در سطح مایع می‌باشد. در تعریفی دیگر که بیشتر در مورد جامدات صادق می‌باشد، فوم ماده‌ای سبک و حفره‌دار است که در اثر به وجود آمدن حباب‌های گاز، در فرآیند تولید، تشکیل می‌گردد [1]. یکی از مناسب‌ترین گزینه¬ها برای کاربرد فوم در مواد عایق است [2]، یکی از این فوم ها از نوع فوم شیشه است که طول عمر تقریبا نامحدودی دارد و خواص فیزیکی آن، با زمان، تغییر نمی‌کند [3]. فوم های شیشه ای، مصالح ساختمانی ای هستند که امروز رقیب عایق های پلیمری و مواد فیبری، برای پوشش حرارتی شده‌اند. مهمترین و رایج‌ترین روش تولید حال حاضر، روش زینتر پودر شیشه در حضور عوامل فوم‌زا و افزودنی می‌باشد [4]. اکثر مواد متخلخل با استفاده از عوامل اسفنجی کننده حاصل می‌شوند که طی آن بخشی از ماده تجزیه شده و خروج گاز را در پی دارد. از جمله مزایای این روش، امکان تهیه شکل های مختلف می باشد. از طرفی به کمک این روش می‌توان تخلخل‌های بسته‌ی کوچکی را ایجاد کرد که از طریق روش‌های دیگر امکان پذیر نیست [5].

اگر نوع عامل فوم‌زا به درستی انتخاب شده باشد، پس از اینکه جداره های یکنواخت و ویسکوز شیشه تشکیل شدند، فشار گاز حاصل از واکنش فوم زا حجم داخل سلول خود را افزایش می دهد. جمع افزایش حجم این حفرات، منجر به افزایش حجم قطعه، می‌گردد [6]. تجزیه‌ی بسیاری از عوامل فوم¬زا، میزان کمی خاکستر بسیار ریز پراکنده بر جای می‌گذارد، که می‌تواند بر برخی از خواص شیشه نظیر ویسکوزیته و تمایل به تبلور اثر بگذارد. عوامل فوم‌زایی که درکل پذیرفته شده اند، بر اساس نحوه تولید گاز و واکنش، به دو دسته‌ی مواد های خنثی شامل کربنات‌هایی همچونNa_2CO_3 و $CaCO_3$ و $BaCO_3$ و کاهنده (همچون کربن، SiC، شکر و نشاسته) تقسیم بندی میشوند. در تحقیقات بسیاری از شیشه‌های پایه متنوعی از جمله شیشه لامپ کاتدی، سودالایم ضایعاتی، سرباره، و خاکستر ذغال سنگ استفاده شده است [8-7] در حین نرم شدن تدریجی شیشه‌ی زینتر شده، تحت حرارت دهی، ذرات کربنات‌های کلسیم یا سدیم، به اکسید تجزیه شده و با خروج گاز دی اکسید کربن همراه است. اکسید حاصل از واکنش وارد مذاب شیشه شده و به عنوان عامل دگرگون ساز شیشه عمل کرده، بنابراین ویسکوزیته‌ی مذاب

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۸/۲۹ و تاریخ پذیرش آن۱۴۰۰/۱۱/۱۷ می‌باشد.
(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، پژوهشگاه مواد و انرژی ، پژوهشکده سرامیک، مشگین دشت ، البرز، ایران.
Email : a.faeghinia@merc.ac.ir
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی ، پژوهشکده سرامیک، مشگین دشت ، البرز، ایران.

شیشه را تغییر می‌دهد. گاز CO_2 خروجی در شیشه‌ی ویسکوز به دام افتاده و فشار به تدریج افزایش یافته و سبب منبسط شدن مذاب شیشه خواهد شد. سپس در هنگام سرمایش، مذاب شیشه متراکم شده و ساختار حفره داری شکل می‌گیرد. یک شیشه نرم می‌تواند در اثر واکنش فضاهای بین ذره‌ای با یک عامل فوم زای مناسب تبدیل به فوم شود. معمولا در شیشه‌های نرم بر اثر اکسیداسیون عوامل فوم‌زای حاوی کربن (همچون کربن، SiC، شکر و نشاسته) دی اکسید کربن تولید می-شود SiC .نیز فوم‌زایی بسیار کاربردی می‌باشد، که محصولات گازی آن CO و CO_2 است .

در این مقاله به بررسی و مقایسه چند عامل فوم‌زا کربناتی و کاربیدی واکسید کروم با درصدهای وزنی مختلف بر کامپوزیت شیشه و سرباره پرداخته شده است. اثر این عوامل فوم زا بر دانسیته، و تخلخل و انبساط طولی با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت تبلور و ریزساختار و استحکام مکانیکی نمونه¬هایی که از لحاظ ریزساختاری و دانسیته مناسب هستند، اندازه¬گیری و مقایسه شده است. هدف از این کار استفاده از ضایعات سرباره فولاد جهت مصارف در مصالح ساختمانی عایق است که از طرفی ضایعات این صنعت از لحاظ ارزش افزوده مورد مطالعه قرار گیرد از طرفی فوم زاهای مختلف به همراه شیشه باطله نیز در کامپوزیت مذکور استفاده شود.

روش تحقیق

در ابتدا دو ترکیب شیشه ساختمانی و سرباره فولاد تحت عمل خردایش ریز شده و به مش زیر ۱۵۰ رسانده شدند. از آنجایی که پودر سرباره اولیه غیریکنواخت بوده و ناهمگونی ساختاری، و رگه های رنگی در ذرات شیشه ای آن مشهود بود، لذا برای اطمینان از یکنواختی ترکیب، سرباره در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد ذوب، و فریت آن تهیه شد. فریت حاصل شده پس از قرار گرفتن در خشک کن با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد، با استفاده از هاون برقی به مدت ۴۵ دقیقه آسیاب شد. دو پودر شیشه و پودر سرباره آمورف با نسبت وزنی مساوی با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص‌های با شعاع ۲ سانتی متر و ضخامت بین ۳-۴ میلی‌متر با استفاده از پرس هیدرولیک تک محوری اتوماتیک ساخت ایران، با فشار ۱۰۰ مگاپاسکال تهیه شدند. از ۲ درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز CMC برای افزایش چسبندگی و افزایش استحکام خام استفاده شد. پنج نوع عامل فوم‌زا شامل: کاربید سیلیسیم (SiC)، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، کربنات باریم ($BaCO_3$)، اکسید کروم (Cr_2O_3) به همراه ۱ قسمت وزنی گرافیت به عنوان کاهنده، و همچنین خود گرافیت، به صورت جداگانه، به ترکیب پایه افزوده شده، و تغییرات ایجاد شده از نظر دانسیته و تخلخل و فازهای ایجاد شده بررسی گردید. تمام فوم‌زاهای افزوده شده، شامل پنج میزان متفاوت ۱، ۲، ۳، ٤ و ٥ قسمت وزنی در ترکیب اضافه شد. دانسیته پودر ترکیب پایه اصلی که برای تمامی نمونه‌های فوم‌زایی انتخاب شد، با استفاده از دستگاه پیکنومتری گازی (Accupyc 1330 v3.00) بر اساس استاندارد (ASTM-D5550) اندازه¬گیری شد. تست برای هر نمونه ۱۰ بار تکرار شده و میانگین اعلام شد.برای اندازه¬گیری دانسیته از روش ارشمیدسی مطابق استاندارد ASTM-C20 استفاده شد.

با کمک داده‌های دانسیته ارشمیدسی و پیکنومتری، و با استفاده از روابط زیر، درصد تخلخل کل، تخلخل باز و بسته و دانسیته نسبی نمونه‌ها محاسبه شدند.

$$\text{دانسیته٪ بالک} = \frac{\text{وزن خشک}}{\text{وزن اشباع} - \text{وزن غوطه‌وری}} \times 100$$

$$\text{٪ تخلخل باز} = \frac{\text{وزن اشباع} - \text{وزن خشک}}{\text{وزن اشباع} - \text{وزن غوطه‌وری}} \times 100$$

$$\text{چگالی٪ نسبی} = \frac{\text{دانسیته بالک}}{\text{دانسیته تئوری}} \times 100$$

$$\text{تخلخل٪ بسته} = \text{تخلخل٪ کل} - \text{تخلخل٪ باز}$$

برای محاسبه درصد انبساط طولی از رابطه زیر استفاده شد و تغییرات ضخامت به عنوان انبساط طولی در نظر گرفته شد.

$$\text{انبساط طولی }\% = \frac{\text{طول اولیه} - \text{طول ثانویه}}{\text{طول اولیه}} \times 100$$

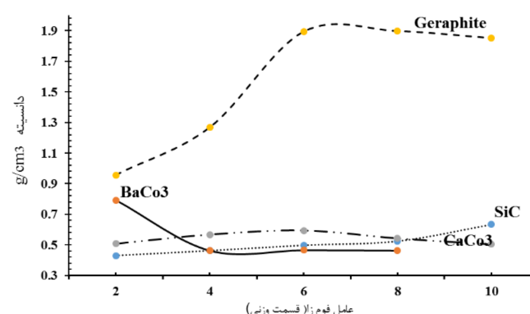
با توجه به سطوح ناصاف نمونه‌ها بعد از فومی شدن، برای تعیین ضخامت هر نمونه، ضخامت ٤ نقطه اندازه گیری شده و میانگین آن اعلام شده است.

اندازه گیری استحکام فشاری. استحکام فشاری نمونه های زینتر شده بر اساس استاندارد ASTM 04179-889 انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱cm و ارتفاع ۲cm توسط اعمال نیروی پرس هیدرولیک شکسته شده و با استفاده از نیروی شکست به دست آمده و با کمک رابطه زیر، استحکام فشاری نمونه‌ها محاسبه گردید.

$$\text{استحکام فشاری} = \frac{\text{نیروی وزن اعمالی}}{\text{سطح مقطع}}$$

نتایج و بحث

در شکل (۱) نمودار تغییرات دانسیته کلی، با افزایش میزان عامل فوم-زا از ۱ تا ۵ قسمت وزنی، آورده شده است.



شکل ۱ نمودار تغییرات دانسیته کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عامل فوم‌زای کربنات باریوم و کلسیم و اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم از ۱ تا ۵ قسمت وزنی

با افزایش میزان دو فوم‌زای کربنات کلسیم و باریم، دانسیته با شیب ملایمی کاهش یافته و در واقع نزدیک به ثابت است.

در حین نرم شدن تدریجی شیشه‌ی زینتر شده، تحت حرارت دهی، ذرات کربنات‌های کلسیم یا سدیم، به اکسید تجزیه شده و با خروج گاز دی اکسید کربن همراه است. واکنش ۱تجزیه $CaCO_3$ را نشان می‌دهد.



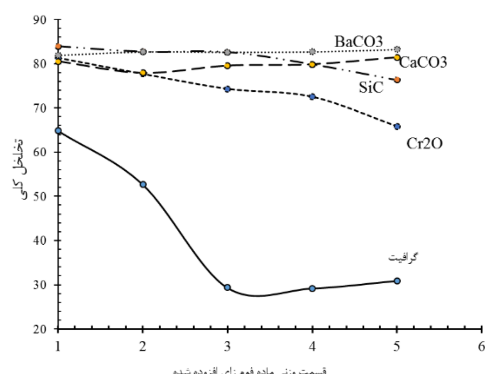
$$CaCO_3 \leftrightarrow CaO + CO_2 \qquad (۱)$$

اکسید حاصل از واکنش وارد مذاب شیشه شده و به عنوان عامل دگرگون ساز شیشه عمل کرده، بنابراین ویسکوزیته‌ی مذاب شیشه را تغییر می‌دهد. گاز CO_2 خروجی در شیشه‌ی ویسکوز به دام افتاده و فشار به تدریج افزایش یافته و سبب منبسط شدن مذاب شیشه خواهد شد. سپس در هنگام سرمایش، مذاب شیشه متراکم شده و ساختار حفره داری شکل می‌گیرد [13].

اما در مورد Cr_2O_3 و SiC برعکس این مطلب صادق است. با افزایش میزان این دو فومزا، به نظر می‌رسد که افزایش حجم مختل شده و دانسیته افزایش یافته است. این موضوع در استفاده از میزان بیشتر گرافیت (شکل۱) نیز صدق می‌کند و این روند در میزان ۳ قسمت وزنی و بالاتر، بسیار شدیدتر است و حتی باعث کاهش حجم نمونه اولیه و پخت شدن آن شده و از ۱٫۲۶ گرم بر سانتی متر مکعب به ۱٫۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده است.

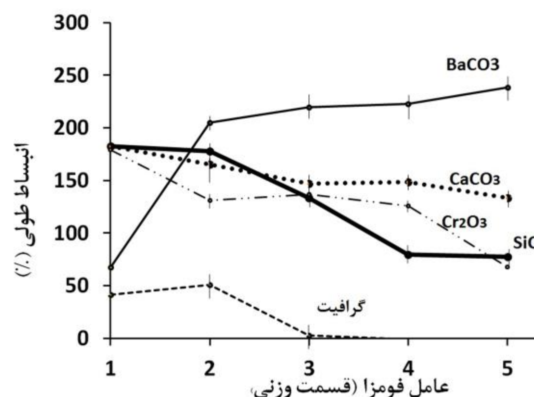
کمترین میزان دانسیته مربوط به نمونه‌های فوم‌زای $BaCO_3$ است، که در میزان ۵ درصد وزنی این فومزا، ۰٫۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. بیشترین میزان دانسیته نیز ۱٫۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و مربوط به نمونه حاوی ٤ قسمت وزنی گرافیت، با در نظر نگرفتن ترکیبات گرافیتی دانسیته، ۰٫۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مربوط به نمونه¬های حاوی Cr_2O_3 می-باشد که از میزان ۲ قسمت وزنی به بعد، شدیدا افزایش دانسیته داشته است.

در نمودار تخلخل کل (شکل۲)، روند کلی تغییرات، تقریبا برعکس دانسیته است. بیشترین میزان تخلخل ۸۳ درصد حجمی و مربوط به نمونه ۵ قسمت وزنی $BaCO_3$ است. کمترین میزان تخلخل هم، ۲۹٫۲۰ گرم بر سانتی¬متر مکعب و مربوط به نمونه شامل ٤ قسمت وزنی گرافیت ، ٦٥٫٨٥ گرم بر سانتی¬متر مکعب، مربوط به نمونه ۵ قسمت وزنی Cr_2O_3 می¬باشد.



شکل ۲ نمودار تغییرات تخلخل کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عامل فوم زای کربنات باریم و کلسیم و اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم از ۱ تا ۵ قسمت وزنی

شکل (۳) نیز مقایسه انبساط طولی نمونه‌ها است.



شکل ۳ نمودار تغییرات انبساط کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عوامل فوم زا ۱ تا ۵ قسمت وزنی

درنمونه‌های گرافیت دار از ۳ قسمت وزنی به بعد، انقباض نیز مشاهده می‌شود. اما به طور کلی در مورد نمونه¬های عاری از گرافیت، کمترین میزان انبساط ٦٧ و بیشترین آن ۲۳۸ درصد می‌باشد.

افزایش حجم زیاد، که در نمونه‌های دارای $BaCO_3$ بالای ۲ قسمت وزنی صورت گرفته است، باعث ایجاد ترک‌های انفجار گونه در قطعات شده است (شکل ٤). اگرچه با افزایش میزان $BaCO_3$، انبساط چندان افزایش نداشته است، اما فوم‌زای تجزیه شده با راه یافتن به سطح، از نمونه خارج شده است. در واقع می‌توان گفت که با افزودن قسمت‌های وزنی بیشتر از ۲ درصد، حجم چندان افزایش نیافته و مازاد گازهایی که تولید می‌شوند، از نمونه خارج شده و تخلخل نافذ (راه به در) باقی می‌گذارند [6]. افزایش این نوع حفره‌ها با افزایش مقدار $BaCO_3$ در تصاویری که از ظاهر نمونه‌ها در شکل (٤) آورده شده است، مشهود است.



شکل ٤ ظاهر نمونه های کامپوزیت بعد از زینتر در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد

قابل ذکر است که به دلیل بالا بودن سرعت گرمایش، تجزیه $BaCO_3$ نیز سریعتر صورت گرفته و فشار ناگهانی وارد شده بر سطح، پیش از آنکه راه خروج از سطح ایجاد کنند، باعث ایجاد ترک‌های عمیق، و شبیه به انفجار، به ویژه در نمونه ۵ قسمت وزنی از این فوم‌زا شده است.

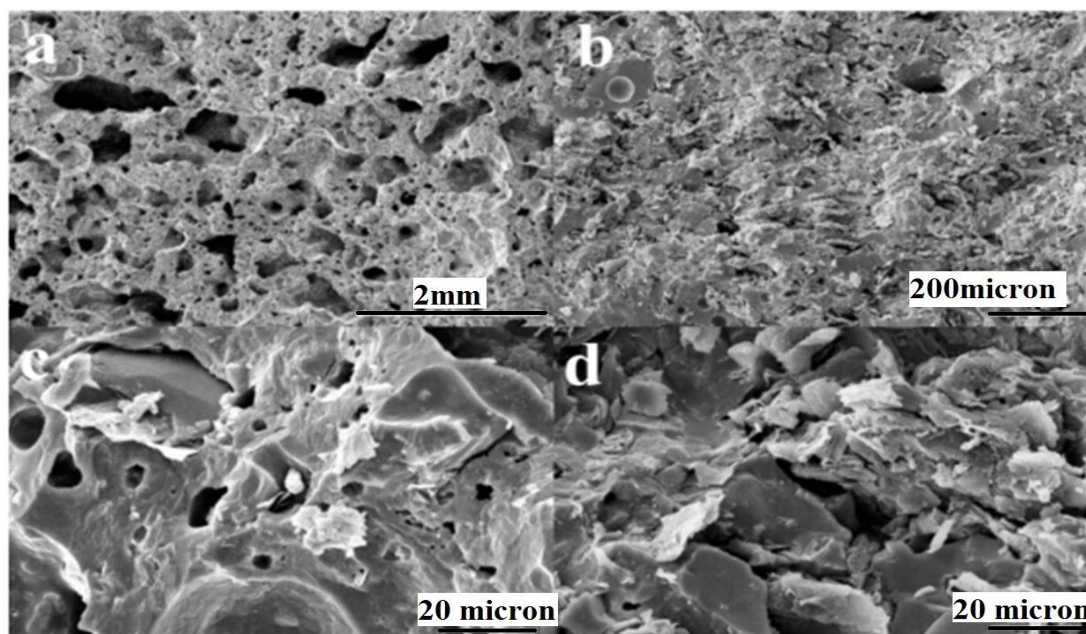
از آنجایی که کربنات کلسیم بر خلاف SiC یک فوم زای حرارتی است ، لذا بدون نیاز به سایر عوامل، تولید گاز میکند. بنابر همین دلیل است که با افزایش مقدار آن، بخش قابل توجهی از آن ترکیب باقی نمی ماند و تقریبا همه آن تجزیه و از نمونه خارج می گردد. CaO حاصل از تجزیه کربنات کلسیم می تواند باعث کاهش ویسکوزیته مذاب شیشه گردد. به همین دلیل، می توان بخشی از افزایش حجم زیاد در حضور کربنات کلسیم را به این موضوع نسبت داد (شکل ٤) [7] .ضمنا تجزیه سریع آن که بر خلاف SiC در بازه کوتاهی رخ میدهد و فشار گاز به طور ناگهانی افزایش یافته و بر کشش سطحی جداره های تخلخل ها غلبه میکند. این غلبه بر کشش سطحی، وقتی که در نزدیکی سطح اتفاق بیفتد، باعث ایجاد حفره سطحی و تخلخل باز می گردد [7]

فوم زایی گرافیت، با مکانیزم واکنشی است و با ترکیب با اکسیژن در حدود ۸۰۰ درجه سانتی گراد و تبدیل شدن به گاز مونو و دی اکسید کربن باعث افزایش حجم نمونه می گردد. بنابراین افزودن مقادیر بیش از اندازه آن در ترکیب باعث باقی ماندن آن در ترکیب و تاثیر بر رفتار شیشه می گردد به این صورت که با اتمام اکسیژن های موجود در یک تخلخل، بخشی از کربن در ساختار شیشه حل شده و با تاثیر گذاری بر ویسکوزیته و کاهش آن امکان خروج گازهای تولید شده و جانشین شدن مذاب ویسکوز را فراهم آورده است. به همین دلیل، نمونه های دارای کربن بیش از دو قسمت وزنی نه تنها انبساط نداشته اند بلکه منقبض نیز شده اند.

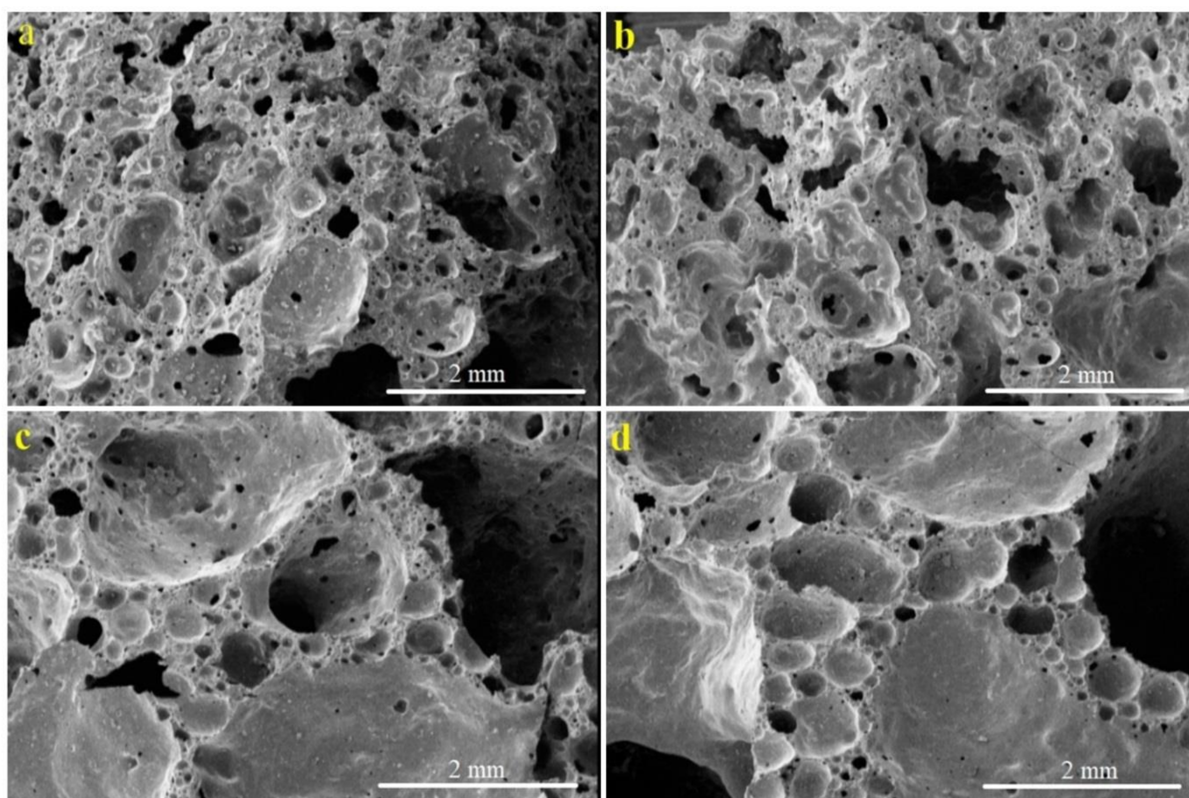
شکل (۵) میزان انقباض در ساختار کامپوزیت کربن دار را نشان میدهد.

برای دریافتن میزان کربن خارج شده از ساختار کربن دو نمونه ۱و ۵ درصد وزنی بعد از پخت اندازه گیری شد. میزان کربن باقی مانده در ترکیب ۱ قسمت وزنی معادل ۰,۲ درصد و در مورد نمونه ۵ قسمت وزنی معادل ۱ درصد وزنی بود. در نتیجه می توان گفت که با افزودن مقدار کربن مقدار بیشتری در ساختار باقی می ماند و در پی آن، با مختل کردن تاثیر کربن هایی که اکسید شده اند، روند کاهشی دانسیته را، در خلاف جهت پیش می برند.

در پژوهشی عنوان شده است که در SiC تغییرات حجمی بسیاری به سبب انتقالات چند شکلی فازهای حاصل از واکنش و تجزیه، ممکن است در هنگام سرمایش فوم ها، منجر به ترک های ریز و در نتیجه نمونه های ضعیف از نظر مکانیکی شود (شکل ٦)



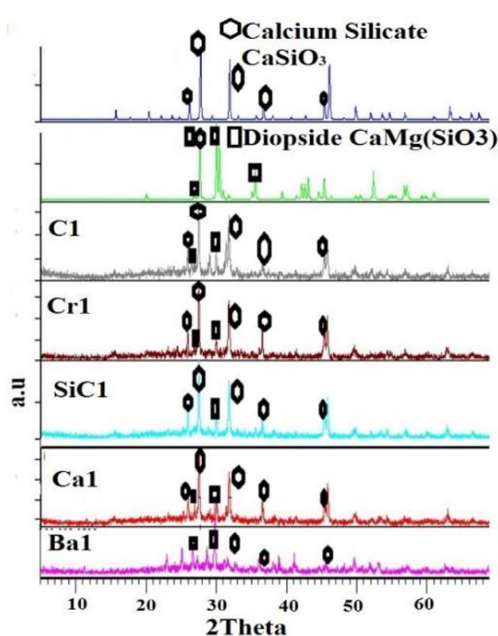
شکل ۵ میکرو ساختار کامپوزیت با ۱ درصد وزنی کربن (a),(c) و۵ قسمت وزنی(d)و(b)



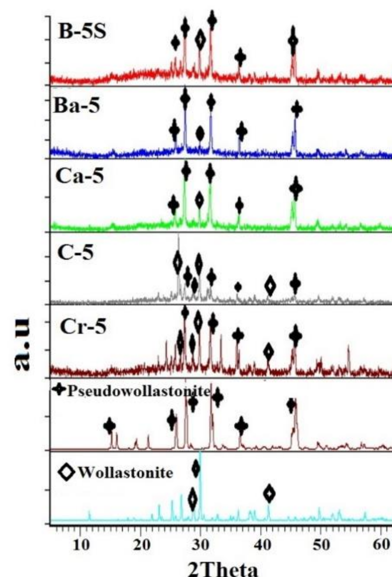
شکل ٦ تصاویر SEM از ریز ساختار نمونه کامپوزیت حاوی کربنات کلسیم (a) با یک قسمت وزنی کربنات کلسیم (b) با ۵قسمت وزنی کربنات کلسیم

بررسی فازی. همانگونه که در شکلهای (۷ و ۸) مشاهده میشود در صورت استفاده از عوامل فوم زای کربنات کلسیم و باریم و کربن و کاربید سیلیسوم به مقدار یک درصد وزنی، فازهای کلسیم سیلیکاتی $CaO.SiO_2$ با نسبت مولی ۱:۱ و دایوپساید تشکیل میشود . مشخص است که فاز کریستایل دایوپساید مربوط به شیشه سودالایم می باشد که تبلور آن در شیشه سودالایم قبلا توسط دیگران گزارش شده است [6] و فاز کلسیم سیلیکاتی نیز ناشی از تبلور سرباره می باشد. اما در صورت افزایش مقدار عامل فوم زا به ۵ درصد وزنی، پیک های تبلور مربوط به دایوپساید از بین رفته و این بار فاز وولاستونیت و شبه وولاستونیت Ca_3SiO_3,$Ca_3Si_3O_9$ تشکیل می شود.

بنابراین در کل فازهای کلسیم سیلیکاتی وولاستونیت و شبه ولاستونیت، فاز غالب در پراش اشعه ایکس از نمونه های پخت شده است. این امر به دلیل وجود مقادیر بالای CaO,SiO_2 در ترکیب سرباره فولاد طبیعی است. از طرفی تبدیل وولاستونیت به شبه وولاستونیت در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی گراد در فشارهای کم توسط زمین شناسان گزارش شده است که می دانیم فاز شبه وولاستونیت از نوع سیلیکات کلسیم حلقوی با ذوب غیر ناگهانی و ولاستونیت از نوع سیلیکات زنجیره ای با ذوب ناگهانی است.



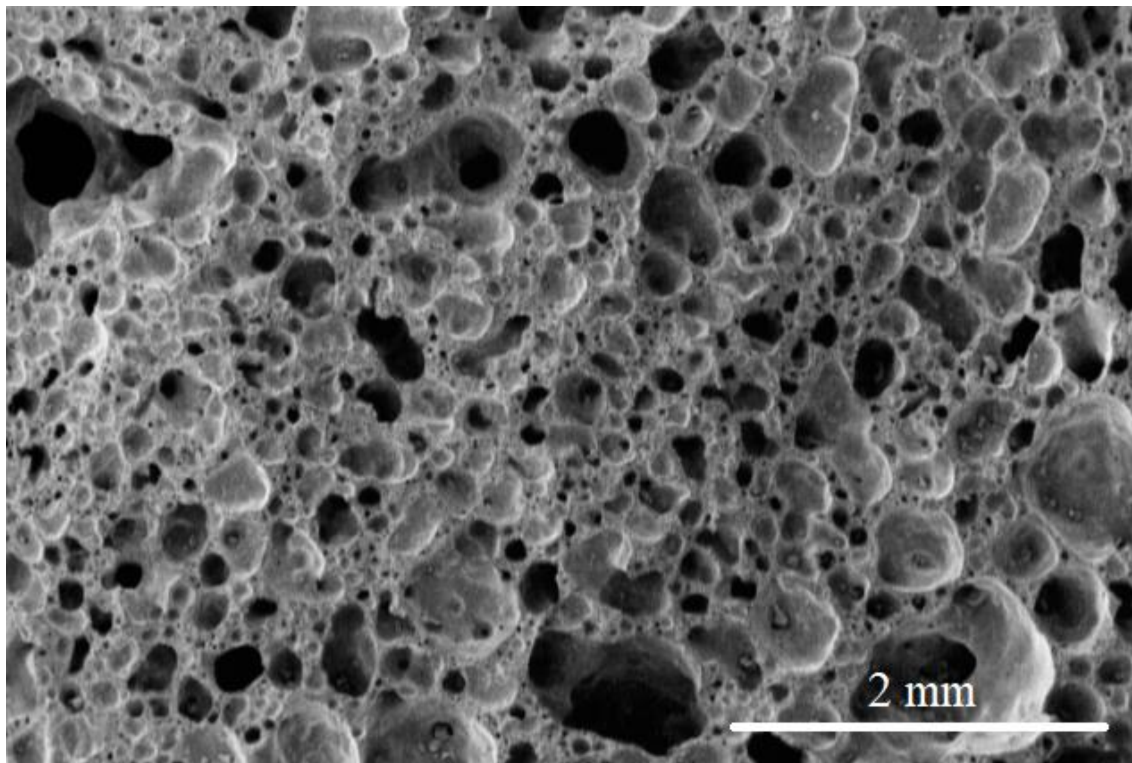
شکل ۷ تغییرات فازی کامپوزیت با عوامل فوم زا کربنات کلسیم CAو کربنات باریم BA و کربن C1و اکسید کروم CR به میزان یک درصد وزنی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد سیلیکات کلسیم دایوپساید



شکل ۸ تغییرات فازی کامپوزیت با عوامل فوم زا کربنات کلسیم CAو کربنات باریم BA و کربن C1و اکسید کروم CR به میزان پنج درصد وزنی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد شبه وولاستونیت و ولاستونیت

در مورد تبدیل شدن سیلیکات کلسیم به وولاستونیت از آنجا که بیشتر عناصر دیگر نیز از جمله سیلیس می توانند در شبکه وولاستونیت جای گیرند، بنابرین تبدیل سیلیکات کلسیم $CaSiO_3$ در نهایت می تواند به وولاستونیت $Ca(SiO_3)_9$ و شبه وولاستونیت ختم گردد [9].

در مورد استفاده از فاز اکسید کروم برعکس بقیه عوامل فوم زا میزان فاز با افزایش عامل فوم زای اکسید کروم فاز وولاستونیت در درصد وزنی بیشتر آن (یعنی ۵ درصد وزنی) تشکیل می شود که می تواند دلیل بر اکسیدی شدن محیط در اثر تبدیل فازی اکسید کروم باشد و اینکه این فاز (ولاستونیت) در شرایط اکسیدی تثبیت میشود و تغییر فاز به شبه وولاستونیت را با افزایش درصد وزنی اکسید کروم ندارد [10]. شکل (۹) ریز ساختار نمونه کامپوزیت حاوی اکسید کروم را نشان میدهد. همانطوریکه مشاهده می شود شکل تخلخل ها و توزین ها از یکنواختی بیشتری نسبت به نمونه های کربناتی بر خوردار است و بیانگر این مطلب است که ایجاد فاز اکسیژن می تواند به ایجاد تخلخل نیز کمک کند [11].



شکل ۹ نمونه کامپوزت حاوی ۵٪ اکسید کروم

بررسی استحکام فشاری نمونه های فوم زایی. استحکام در فوم ها به شدت به توزیع اندازه تخلخل ها وابسته است اگر چه هنوز رابطه ای میان توزیع تخلخل با هدایت حرارتی به اثبات نرسیده است اما استحکام به شدت متاثر از آن است [12-16]. استحکام از سه ترکیب دارای توزیع بهتر تخلخل از سه ترکیب حاوی سه نوع فوم زای کاربید کلسیم اکسید کروم و کربنات کلسیم تست استحکام فشاری گرفته شد. جدول (۱) میانگین استحکام فشاری این سه ترکیب را نشان میدهد.

جدول ۱ میانگین استحکام فشاری سه کامپوزیت در حضور عوامل فوم زای کربناتی و کاربیدی

نمونه	B-1SiC	$B\text{-}1Cr_2O_3$	$B\text{-}1CaCO_3$
استحکام فشاری MPa	۲/۵	۳/۲	٤/۸

بالاترین استحکام مربوط به فوم زای کربنات کلسیم و پایین ترین استحکام مربوط به فوم زای کاربید سیلیسم می باشد. به نظر می رسد به دلیل انتقالات چند شکلی فازهای حاصل از تجزیه SiC ممکن است در هنگام سرمایش فوم ها ترک های ریز ایجاد و نمونه ها از نظر مکانیکی تضعیف شوند.

نتیجه گیری نهایی

با افزودن ضایعات شیشه به سرباره به میزان ۵۰ درصد وزنی در حضور عوامل فوم زا کربنات کلسیم ، کربن، اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم و کربنات باریوم پخت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد کامپوزیت متخلخل به دست آمد.

نمونه حاوی ۱ درصد وزنی کربنات کلسیم با تخلخل ۸۰ درصد دارای استحکام فشاری ٤/۸ مگا پاسکال و نمونه دارای ۱ درصد اکسید کروم با تخلخل ۸۲ درصد وزنی دارای استحکام فشاری ۳/۲ مگا پاسکال و نمونه ی دارای یک درصد وزنی کاربید سیلیسوم با تخلخل ۸۳ درصد دارای استحکام فشاری ۲/۵ مگا پاسکال می باشد.

مراجع

1. Marangoni, M., Seccobc, M., Parisattocd, M., Artiolicd, G., Bernardoa, E., “Cellular glass – ceramics from a self foaming mixture of glass and basalt scoria,” *Journal of. Non. Crysttaline. Solids*, Vol. 403, pp. 38–46, (2014).
2. Pittsburgh Corning (UK) Ltd, “FOAMGLAS ® for the Building Envelope.” London, EC1N 8TE, PP.670-676,(1975)
3. Yatsenko,E.A., B. M. Goltsman,B.M., V. A. Smolii,V.A., and A. S. Kosarev,A.S., “Foamed slag glass - Eco-friendly insulating material based on slag waste,” *in 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, EEEIC 2015 - Conference Proceedings, Vol. 0124, pp. 819–823,(2015).
4. Hojaji, H., “development of foam glass, structural insulation”, MRS Online Proceeding Library Archive 136, Vol. 136, pp. 185–206, (1988).
5. Vancea, C and I. Lazău, I “Glass foam from window panes and bottle glass wastes”, *Central European Journal of Chemistry*., Vol. 12, No. 7, pp. 804–811, (2014).
6. Scheffler,M., Colombo. P., and Scheffler, M., “Cellular Ceramics Structure, Manufacturing, Properties and Applications”, Wiley,New york. pp. 31320-4, (2006).
7. Ponsot, I and E. Bernardo, “Self glazed glass ceramic foams from metallurgical slag and recycled glass”, *Journal of Clean Products*., Vol. 59, pp. 245–250, (2013).
8. Ye,Z., Wang,Y., Jiang, H., Li, N. and Liu, S. “Foamed glass-ceramics made from red-mud”, *Key Engineering. Materials.*, Vol. 575–576, pp. 461–464, (2014).
9. Arcaro, S., de B. G. Maia, O. Souza, M. T. Cesconeto, F. R. Granados, L. and de Oliveira, A. P. N. “Thermal Insulating Foams Produced From Glass Waste and Banana Leaves”, *Materials Research*., Vol. 19, No. 5, pp. 1064–

1069, (2016).

10. Brusatin, G., Scarinci, L. Zampieri, and P. Colombo, “Foam glass from cullet”, Glass Machinery Plants & Accessories, (2002).
11. Mangutova, B., Fidancevska, E., Milosevski, M., and Bossert, J., “Production of highly porous glass-ceramics from metallurgical slag, fly ash and waste glass”, *Acta Periodica Technologica*, Vol. 280, No. 35, pp. 103–110, (2004).
12. Mardi, H., Faeghinia,A., “Compressibility and Foaming behavior of steel slag/waste glass compositesby particle size distribution and foam agents”, *Journal of Advanced Ceramics Progress*, Vol. 5, No. 1 pp. 23-3, (2019).
13. Khalili. M ., Zamani, F., “ Development of Clay Foam Ceramic as a Support for Fungi Immobilization to Biodiesel Production”, *International Journal of Engineering TRANSACTIONS B: Applications* , Vol. 27, No. 11, pp. 1691-1696, (2014).
14. Akbarpoor, S., Karbasi, S.,” Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Titanium dioxide Composite Scaffold for Tissue Engineering Applications”, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol.3,No.3, pp.17-26, (2014).
15. Nianhua Chen, N., Zhang, Sh., Pan, X., Zhou, S., “Foaming mechanism and optimal process conditions of foamed glass based on thermal analysis” , Journal of Porous Materials, Vol. 27, pp. 621–626, (2020).
16. Sassi, M., Jamal-Eldin, F. M., Andrea, I., “Characterization of foam glass produced from waste CRT glass and aluminium dross”, *Journal of Physics Conference Series*, Vol.1527, No.1, pp. 120-137, (2020).
17. Shahsavari, P., Eftekhari Yekta B., Marghussian, V. K. ,” High Strength Pyroxene-Based Glass- Ceramic Foams in the Presence of Fe2O3” ,*Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp.1-10, (2020).